

粉土地基地铁车站受旁侧基坑开挖影响实例分析

姜叶翔¹, 陈俊辉², 熊晓亮², 岑仰润², 刘恒新²

(1. 杭州市地铁集团有限责任公司, 浙江 杭州 310003; 2. 杭州市勘测设计研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要:本工程位于钱塘江边, 基坑开挖范围内以粉砂性土为主, 上部粉砂性土中分布为潜水, 下部圆砾层中分布有承压水, 地下水控制是本工程成败的关键。基坑临近地铁一侧采用 TRD 水泥土搅拌墙止水帷幕, 其余范围采用三轴水泥土搅拌桩帷幕, 电梯井深坑采用高压旋喷桩封底加固。实际施工过程中发生了止水帷幕渗漏和坑底承压水突涌事故, 现场采取了双液注浆和油性聚氨酯注浆液注浆堵漏处理, 可为类似粉土地基基坑设计、施工和地铁设施保护提供参考。

关键词: 粉土地基; 旁侧基坑; 止水帷幕; 承压水; 地铁

中图分类号: TU74

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)02-0170-06

Influence of side excavation on the subway station on silty soil foundation

JIANG Ye-xiang¹, CHEN Jun-hui², XIONG Xiao-liang², CEN Yang-run², LIU Heng-xin²

(1. Hangzhou Metro Group Co., Ltd., Hangzhou 310003, China;

2. Hangzhou Geotechnical Engineering & Surveying Research Institute, Hangzhou 310012, China)

Abstract: This project is located near Qiantang River. The excavation area of the foundation pit is dominated by silty soil, the upper silty soil is distributed as phreatic water, and the lower round gravel layer is distributed as confined water. Groundwater control is the key point to the success of this project. TRD cement-soil waterproof curtain was used to cut off the groundwater on the side of the foundation pit near the subway, and triaxial cement mixing method was used on the other sides of the pit. In the actual construction process, leakage of waterproof curtain and heave-piping of confined water at the bottom of the pit occurred. Two shot grouting and oil polyurethane grouting were used to stop the leakage. This case study can provide references for the design and construction of silty foundation pit and the protection of subway facilities.

Key words: silty foundation; side foundation pit; waterproof curtain; confined water; subway

0 引言

在基坑开挖过程中, 土体应力重新分布、施工扰动、固结沉降、止水帷幕渗漏等因素会导致周边地层产生位移和变形, 从而引起临近地铁车站产生内力和变形^[1]。已运营地铁线路对变形要求极为严格, 基坑施工过程中应采取合理的支护形式和开挖方式, 将基坑开挖和降水对地铁结构的影响控制到最小^[2]。

本文以某临近地铁车站的旁侧基坑工程为实例, 采用有限元数值分析方法, 分析了旁侧基坑开挖对临近地铁车站的影响。砂土地基地下水控制措施尤为关键, 本工程在临近地铁车站一侧采用了

700 厚 TRD 水泥土搅拌墙止水帷幕加强止水, 电梯井深坑坑底采用高压旋喷桩封底加固, 该基坑工程实施过程中发生了渗漏水事故, 现场采取了油性聚氨酯注浆液注浆堵漏处理, 对类似工程有重要指导意义。

1 工程概况

本工程下设 3 层地下室, 基坑北侧临近 2 号线运营地铁车站, 基坑西侧临近 6 号线已建未运营地铁车站, 基坑距离地铁车站最近处约 31.6 m。工程桩采用钻孔灌注桩, 开挖面积约 11 740 m², 基坑周长约 426 m, 基坑普遍开挖深度 14.55 m, 局部电梯

井深坑开挖深度约 19 m。基坑与地铁车站的平面关系详见图 1，基坑与地铁车站的剖面关系详见图 2。

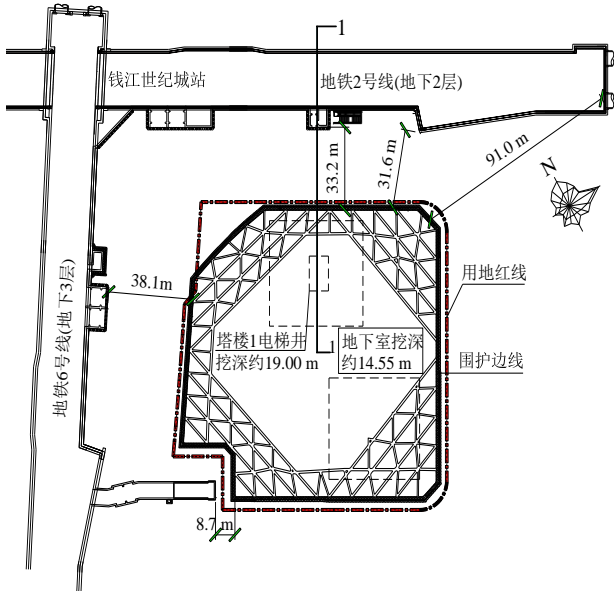


图 1 基坑与地铁车站的平面布置图

Fig. 1 Layout plan of foundation pit and subway station

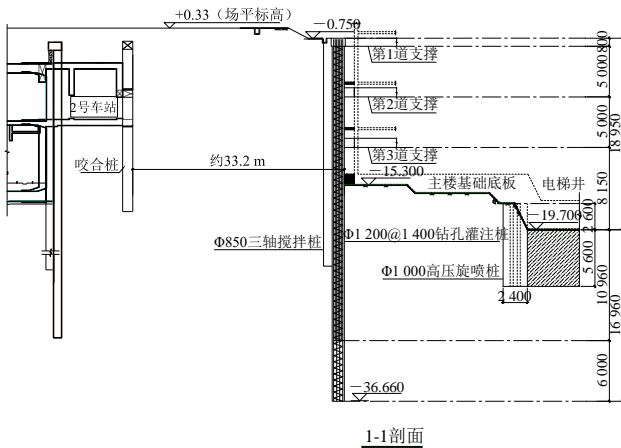


图 2 基坑与地铁车站的剖面图

Fig. 2 Profile of foundation pit and subway Station

场地涉及基坑开挖土层主要为①杂填土、②₁黏质粉土、②₂砂质粉土、②₃砂质粉土、③层淤泥质粉质黏土、③₂粉砂、④砂质粉土夹粉质黏土。基坑开挖范围内以粉性土为主，粉性土厚度约 16 m，该场地地质情况以及基坑范围内典型土层分布情况如表 1 所示。本工程场地地下水主要为浅部孔隙型潜水深部承压水，潜水主要分布在 1 层杂填土和 2 层黏质粉土中，潜水位埋深为地表下 1.00~3.30 m；承压水主要分布于粉砂、圆砾层中，承压水头埋深 6.00 m，相当于 85 国家高程 -0.42 m，年变化幅度 3 m 左右。

2 围护设计方案

本工程采用 Φ1 000 钻孔灌注桩结合 3 道钢筋混凝土支撑，围护桩外侧临近地铁区域采用 TRD 水泥土搅拌墙止水帷幕，远离地铁区域采用 1 排三轴水泥搅拌桩进行止水帷幕。电梯井深坑采用高压旋喷桩封底加固。临近地铁处坑外不设深井，坑内设深井降水。典型支护剖面详见图 2。

3 有限元分析对地铁车站的影响

为预测基坑开挖地铁变形情况，采用三维有限元 GTS NX 计算软件进行分析^[3]。基坑土体采用强化土 (HS) 模型。车站及其附属结构顶板、中板、底板、侧墙等采用板单元；车站柱、支撑采用梁单元模拟；围护结构等刚度等效地连墙，采用板单元模拟；喷混凝土护面采用板单元模拟。模型长 395 m，宽 330 m，高 71.4 m，模型单元数为 359 000 个。建立三维有限元模型如下图 3 所示。

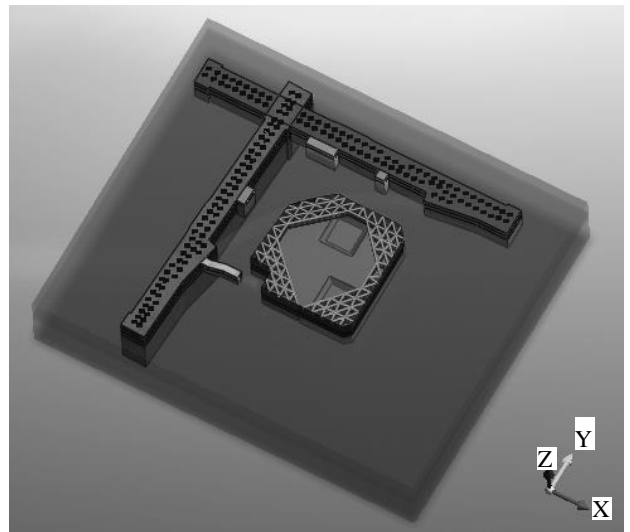


图 3 三维有限元模型示意图

Fig. 3 Three-dimensional finite element model

计算参数主要根据岩土工程勘察报告取用，具体见表 1，部分参数通过地勘报告结合理论、软件说明中的公式进行推导并参考其它工程的经验取值获得。计算结果见表 2。

4 基坑实施及监测情况

4.1 基坑前期主要施工阶段时间一览表

工程于 2017 年 4 月开始桩基施工，于 2019

表1 各土层物理力学参数
Tab. 1 Mechanical parameters for each soil layer

层号	地基土名称	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °	重度/ (kN/m ³)	土层厚度/ m	渗透系数 k_v / (cm/s)	压缩模量 E_s / MPa
①	杂填土	5.0	13.0	18.0	1.0	100E-5	(4.00)
② ₋₁	黏质粉土	12.1	23.6	18.83	3.1	10.7E-5	8.00
② ₋₂	砂质粉土	8.8	25.3	19.19	4.5	24.8E-5	10.00
② ₋₃	砂质粉土	6.6	27.2	19.11	9.4	62.8E-5	12.00
③	淤泥质粉质黏土	17.0	8.1	17.63	7.0	1.22E-5	3.00
④ ₋₁	粉质黏土	35.8	12.5	19.6	4.1	—	6.00
④ ₋₂	粉质黏土	36.7	13.5	19.77	1.8	—	6.00
⑤ ₋₁	粉砂	5.8	31.2	19.34	4.1	—	14.00
⑤ ₋₂	圆砾	0	38	20.0	5.1	—	30.00

注：○内的数值为土层参数经验值。土体 HS 模型相关参数： $E_{oed}=(1.0\sim 1.2)E_s$ ； $E_{50}=E_{oed}$ ； $E_{ur}=(7\sim 10)E_{50}$ 。

表2 主要工况下地铁隧道最大水平位移

Tab. 2 Maximum horizontal displacement of subway tunnel under main working conditions

工况类型	2 号线车站及其附属结构最大变形/mm	
	水平位移	竖向位移
施工围护结构	0.15	0.12
施工第 1 道支撑	0.17	0.08
施工第 2 道支撑	0.45	0.16
施工第 3 道支撑	0.78	0.19
基坑开挖至坑底	1.12	0.35
基坑换撑	1.12	0.34

年 1 月完成地下室顶板浇筑，地下室施工历时约 21 个月，基坑施工工况节点详见表 3。

4.2 桩基施工结束后地铁结构监测情况

地铁监测的主要内容包括车站道床沉降、车站侧墙沉降、车站水平位移、车站两轨高差、冷却塔等附属结构沉降。

地铁监测的主要技术手段：2 号线被监测区域全长约为 150 m。根据隧道监测范围和通视情况，上行监测区域和下行监测区域各布设 1 台监测机器人徕卡 TM50 全站仪进行测量，采用自动化监测结合人工复核测量。

2014 年 10 月 25 日，2 号线道床水平位移累计值为 1.10 mm，道床沉降累计值为 2.1 mm，道床差异沉降值约为 -0.50 mm。地铁道床沉降和水平位移报警累计值为 ±5.00 mm。桩基施工期间道床沉降和水平位移随时间变化曲线详见图 4、图 5。

4.3 基坑施工期间地铁结构监测情况

道床沉降监测：上行线道床沉降累计最大值为 -2.9 mm，停测时累计值为 -1.2 mm；下行线道床沉降累计最大值为 -3.5 mm，停测时累计值

为 -3.3 mm。基坑施工期间道床沉降随时间变化曲线详见图 6。

道床水平位移监测：上行线道床水平位移累计最大值为 1.8 mm，停测时累计值为 1.2 mm；下行线道床水平位移累计最大值为 1.8 mm，停测时累计值为 1.4 mm。基坑施工期间道床水平位移随时间变化曲线详见图 7。

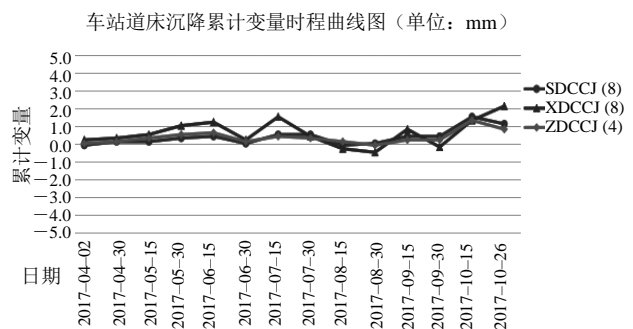


图4 桩基施工期间地铁车站道床沉降位移监测图

Fig. 4 Monitoring graph of vertical displacement of subway railway bed during pile foundation construction

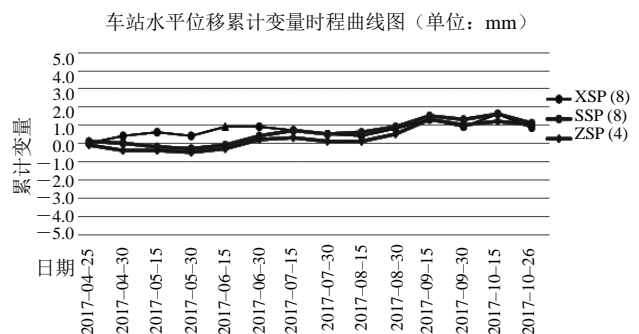


图5 桩基施工期间地铁车站道床水平位移监测图

Fig. 5 Monitoring graph of horizontal displacement of subway railway bed during pile foundation construction

表 3 基坑施工工期表
Tab. 3 Construction schedule of foundation pit

施工时间	简要工况
2017 年 04 月 25 日—2017 年 09 月 25 日	桩基施工完成
2017 年 10 月 09 日—2017 年 11 月 21 日	第 1 道支撑施工
2017 年 11 月 13 日—2017 年 12 月 25 日	第 2 道支撑施工
2017 年 12 月 31 日—2018 年 01 月 30 日	第 3 道支撑施工
2018 年 04 月 24 日—2018 年 09 月 25 日	底板施工
2018 年 09 月 25 日—2018 年 12 月 25 日	地下室结构施工 (除负 1 层顶板)
2018 年 12 月 25 日—2019 年 01 月 28 日	顶板浇筑完成

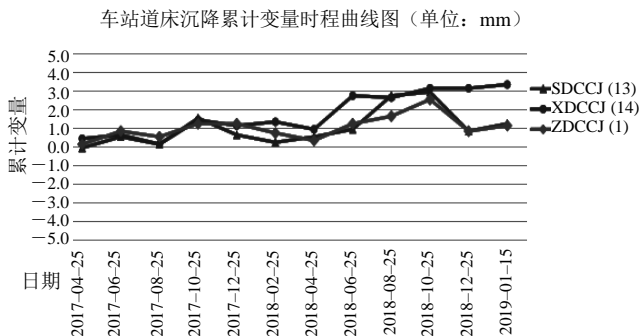


图 6 基坑施工期间地铁车站道床沉降位移监测图

Fig. 6 Monitoring graph of vertical displacement of subway railway bed during foundation pit construction

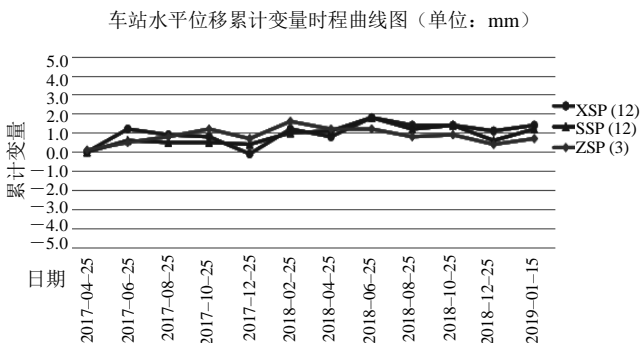


图 7 基坑施工期间地铁车站道床水平位移监测图

Fig. 7 Monitoring graph of horizontal displacement of subway railway bed during foundation pit construction

4.4 基坑本体监测情况

临地铁一侧坑外水位监测情况: 坑外水位孔观测水位在地面下约 6 m, 基坑开挖和地下室结构施工期间坑外地下水位较稳定。

立柱桩沉降位移为 6.22 mm, 基坑开挖和地下室结构施工期间立柱桩沉降数据稳定, 变化量较小。

支撑轴力监测情况: 第 1 道支撑最大支撑轴力约 3 406 kN, 第 2 道支撑最大支撑轴力约 4 639 kN, 第 3 道支撑最大支撑轴力约 3 630 kN。支撑轴力报警值: 第 1 道为 3 500 kN, 第 2 道为 13 000 kN, 第 3 道为 16 000 kN。基坑开挖和地下室结构施工

期间, 支撑轴力数据均正常, 支撑轴力远小于设计报警值。粉砂性土质较好, 基坑围护结构受力不大。

坑外深层土体位移监测情况: 位于临地铁侧 CX2 测斜孔累计位移为 33.5 mm。深层土体位移报警值: 40 mm。基坑开挖和地下室结构施工期间, 累计位移及位移速率小于报警值, 典型深层土体位移监测曲线详见图 8。

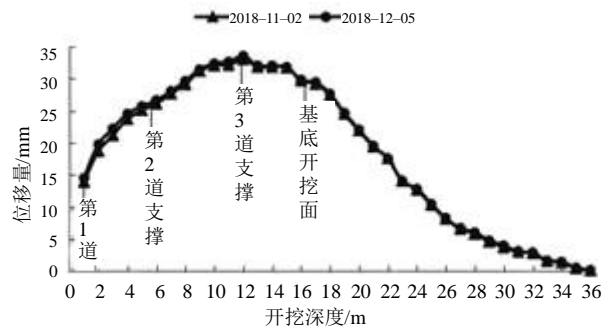


图 8 基坑开挖到底时深层土体位移监测图

Fig. 8 Monitoring graph of deep soil displacement during the bottom excavation of foundation pit

本工程基坑土方开挖和地下室结构施工期间, 临地铁侧坑外地下水位普遍较稳定, 变化幅度较小。基坑南侧坑外水位普遍在地面下 9 m 左右。基坑地面沉降、基坑支撑轴力、围护桩顶位移、立柱桩沉降、深层土体位移测斜数据均未超报警值。表明本工程基坑围护方案在施工质量可靠的前提下可保证基坑的稳定和周边环境的安全。

5 施工过程中发生漏水事故及处理方案

本工程临地铁侧采用 700 厚 TRD 工法水泥土搅拌墙止水帷幕, 其余范围采用 1 排 $\Phi 850$ 三轴水泥土搅拌桩止水帷幕, 2 种水泥土搅拌桩均采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥掺入比均为 22%。基坑开挖到底时, 基坑西南角三轴水泥土搅拌桩和

TRD 止水帷幕交界区域发生渗漏水事故,漏点位于坑底以上约 2 m, 渗漏发生后坑外水位降至地面下约 9 m 左右。分析漏水的原因可能主要有: (1) TRD 和三轴搅拌桩交接面存在施工冷缝, TRD 回切施工不充分, 施工冷缝处理不到位; (2) TRD 和三轴搅拌桩交界面处坑外有市政窰井, 基坑排水主要排入该窰井, 导致窰井水位过高, 且窰井发生渗漏, 最终导致止水帷幕渗漏。

坑壁漏点处理方案: 本工程止水帷幕渗漏且漏水量较大、夹带泥沙时, 采用“外封”的方法进行封堵。坑外采用双液注浆法堵漏, 利用液压通过注浆管把水泥溶液和水玻璃短时间内混合均匀生成水泥胶, 然后注入漏点附附近坑外地层中。利用水泥胶凝结速度快, 强度提高快的特点封堵渗漏通道, 达到堵漏目的。本项目采用坑外双液注浆的方式成功处理了止水帷幕渗漏水事故。粉砂土深基坑, 坑内外水头差较大, 采用传统的三轴水泥土搅拌桩, 渗漏水风险较大。临近地铁设施等敏感环境时, 高水位粉砂性土深基坑宜采用止水可靠的止水帷幕, 如 TRD 工法水泥土搅拌墙止水帷幕。针对不同形式止水帷幕施工冷缝应采取可靠的加强措施, 如采用高压旋喷桩等补强施工冷缝。止水帷幕渗漏造成坑外水土流失, 漏点附近坑外水位监测孔水位在地面下 9 m 左右, 坑外地面沉降明显加大, 坑内大量水土涌入, 延误了底板浇筑工期。

本工程对于电梯井深坑区域已采用高压旋喷桩封底加固, 普遍基坑底承压水抗突涌验算均满足要求。本工开挖到坑底时, 发生过 2 次承压水突涌事故, 经查勘, 承压水沿未有效封堵的勘探孔或钻孔灌注桩壁发生上涌。

承压水突涌处理方案: 现场发生承压水突涌现象后, 立即在突涌点周围回填土方, 并在漏点处采用竖向钢管引流。承压水流基本稳定后, 采用双液注浆和油性聚氨酯注浆液注浆堵漏处理。第 1 次承压水突涌发生生基坑开挖到第 3 道支撑底时, 发生在基坑北侧, 承压水沿勘探孔洞上涌, 采用双液注浆封堵成功。第 2 次承压水突涌发生生基坑开挖到底时, 发生在基坑东侧土坡道中部, 在清理土坡道土方过程中, 承压水沿钻孔灌注桩壁上涌, 采用双液注浆 4 d 左右未能封堵成功, 后续调整为油性聚氨酯浆液注浆 4 d 左右封堵成功。注浆管平面间距约 2 m, 现场共布置约 80 根注浆管。本工程采用对于承压水高水头区域, 勘探孔完成后应采用注浆、灌浆等措施封堵勘探孔; 对于钻孔灌注桩, 应严格

控制钻孔桩壁泥皮的厚度, 防止承压水沿桩壁产生上涌通道。坑底承压水突涌后, 封堵处理难度较大, 且代价较高, 承压水突涌事故延误工期约 1 个月左右, 坑外监测数据无明显变化, 坑内水位孔水位上升明显。

6 结 语

本基坑施工造成运营地铁道床沉降约 -3.5 mm, 地铁道床水平位移约 1.8 mm; 基坑本体监测数据总体正常。本工程施工过程中, 发生过止水帷幕渗漏和坑底承压水突涌事故, 造成工期延误和对周边环境的影响。在临近地铁设施的砂性土深基坑工程中, 若潜水和承压水位较高, 在加强围护桩和内支撑刚度等变形控制措施的同时, 更要重视地下水的控制, 宜采用止水可靠的 TRD 水泥土搅拌墙, TRD 施工期间应控制每日平面进尺, 减少 TRD 水泥土搅拌墙施工期间对周边环境的影响。本工程目前已顺利完工, 预测的变形数据基本与实测数据相符, 证实了有限元数值分析方法运用于评估基坑开挖对地铁设施影响的可行性。对于位于地铁车站旁侧的砂土地基基坑, 通过本基坑的设计和施工可以得到以下结论和启示:

(1) 高水位砂土深基坑工程, 宜选择 TRD 水泥土搅拌墙止水帷幕, 止水帷幕应进入不透水层隔断潜水, 防止基坑降水引起地铁隧道变形。临近地铁设施坑外宜设置应急降水井。

(2) 应重视不同类型止水帷幕施工冷缝的处理, 应有可靠的帷幕冷缝补强措施。

(3) 应重视承压水对深基坑开挖的影响, 电梯井等深坑宜采用高压旋喷桩封底加固; 勘探孔完成后应采取注浆、灌浆等措施封堵勘探孔; 若勘探孔不能确保有效封堵, 宜在勘探孔原位补充搅拌桩等预加固措施。

(4) 处理承压水突涌事故, 采用油性聚氨酯浆液注浆效果优于常规的双液注浆。

(5) 基坑分块施工, 将大基坑分成小基坑, 充分利用了时空效应控制基坑变形。

(6) 桩基施工和基坑降水前应布置好地铁设施监测点, 为保证地铁隧道的安全提供依据。

参考文献

- [1] 刘建航, 侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

[2] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818-823.

[3] 王卫东, 沈健, 翁其平, 吴江斌. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1340-1345.

【简讯】

第二届地下空间开发和岩土工程新技术发展论坛（一号通知 征文）

为促进地下空间开发与岩土工程新技术的学术交流, 推动行业技术发展, 第一届地下空间开发和岩土工程新技术发展论坛于2019年10月在南京召开。300余位来自全国各地高校企业单位的专家学者及工程技术人员出席第一届论坛, 会议期间参会人员交流踊跃, 学术讨论氛围浓厚。本着科学、严谨、务实的办会理念, 大会组委会商议决定于2020年9月在浙江省杭州市召开第二届地下空间开发和岩土工程新技术发展论坛, 同期将介绍岩土工程新技术、新设备。欢迎全国岩土行业同仁积极参与! 现发出大会一号征文通知, 诚邀赐稿!

一、会议主题

本次会议的主题将重点围绕地下空间建造、运维中的岩土工程问题和岩土工程新技术进行讨论交流。会议交流内容包括工程勘察、岩土工程分析与计算、地下空间施工技术、地下管廊和轨道交通中的岩土工程问题、测绘工程、信息化技术应用、检测技术、建造和运维监测技术等。主要议题如下:

- (1) 地下空间开发利用中的岩土工程勘察、设计、施工、监测问题;
- (2) 大规模地下空间、隧道等施工和运营中的岩土工程问题;
- (3) 轨道交通工程施工和监测领域的新技术、新工法和新设备;
- (4) 复杂基坑、基坑群工程设计理论与实践及其新进展、行业的发展趋势;
- (5) 地下空间建造和运维的信息化新技术;
- (6) 地铁、隧道、综合管廊、地下商城等设施的防水、防腐关键技术。

二、会议时间、地点

会议时间: 2020年9月(具体日期二号通知确定)。

会议地点: 浙江省杭州市(具体地点二号通知确定)。

三、会议论文

大会组委会于2020年7月10日前接受论文投稿。应征论文须符合征文内容要求且未公开发表。论文投稿时请按《地下空间与工程学报》期刊格式撰写并投稿至《地下空间与工程学报》, 同时须向会务组提交全文电子文件(邮箱: bianji@yantuchina.com), 论文模板请登录《地下空间与工程学报》网站下载中心下载, 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

本次大会对应征论文的学术水平与写作质量均有严格要求。每篇论文由专家评审决定是否录用。根据被录用论文的研究内容与学术水平, 推荐论文由《地下空间与工程学报》(正刊、增刊)形式发表。

热忱欢迎我国岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

四、论坛组织

主办单位:

中国建筑学会工程勘察分会

中国建筑学会地下空间学术委员会

浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心

杭州考通网络科技有限公司、岩土网

(www.yantuchina.com)

五、会务组联系与报名

中国建筑学会工程勘察分会/中国建筑学会地下空间学术委员会

联系人: 徐前 电话: 010-64013366-504

Email: xuq@cigis.com.cn

杭州考通网络科技有限公司、岩土网

联系人: 倪虹群 电话: 13588371227

邮箱: bianji@yantuchina.com

电话: 0571-89719830